

Impacto do uso da dinâmica de fluidos computacional no processo ensino-aprendizagem aplicado à fenômenos de transporte

Pinheiro, V. P. ^{2*}; Loeffler, C.F. ^{1*}; Neves, N. S. ^{2*}; Rodrigues, R. S. ^{1*}

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

² Departamento de Engenharia Mecânica/Civil, MULTIVIX, Vitória, ES, Brasil.

* e-mail: vitor.pinheiro1987@gmail.com

* e-mail: carlosloeffler@bol.com.br

* e-mail: natan.sian@gmail.com

* e-mail: roger.rodrigues88@gmail.com

Resumo

A área de fenômenos de transporte está presente na matriz curricular de praticamente todos os cursos de Engenharia do país. É tradicionalmente conhecida por discentes e docentes pela complexidade que marca sua modelagem matemática. Tal área compõe um desafio para o aprendizado dos estudantes, no que tange ao real entendimento dos conceitos e visualização dos fenômenos físicos, nem sempre triviais. Por outro lado, as modernas técnicas computacionais de simulação numérica, criadas para superar as limitações dos métodos analíticos de solução e oferecer soluções adequadas às demandas da engenharia moderna, também podem atuar como eficientes ferramentas didáticas, dinamizando o processo de aprendizagem dos alunos. Este artigo propõe a solução de um escoamento laminar no interior de um duto cilíndrico através dos recursos da Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC), com intuito de mostrar os efetivos ganhos ligados ao domínio conceitual dos fenômenos físicos, pela facilidade de reprodução dos fenômenos e controle sobre suas variáveis de estado.

Palavras chave: Dinâmica de Fluidos Computacional, Ensino e Aprendizagem, Fenômenos de Transporte.

Abstract

The area of Transport Phenomena, present through various sciences in the curriculum of virtually all the country's engineering courses, is traditionally known by students and teachers for the complexity that marks their mathematical modeling. This field of study comprises a challenge for student learning, with respect to the real understanding of the concepts and visualization in physical phenomena not always trivial. This paper proposes a solution to a laminar flow inside a cylindrical duct via Computational Fluid Dynamics (CFD), in order to analyze the influence of computational tools of numerical simulation in the improvement of student's learning process. The computational analysis enables effective gains linked to the conceptual domain of physical phenomena, being an important teaching tool.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Teaching and Learning, Transport Phenomena.

1 Introdução

A seara de fenômenos de transporte contempla uma série de problemas de interesse prático e científico na engenharia contemporânea. Tal linha de pesquisa apresenta modelagem matemática robusta e alta exigibilidade no que tange

ao correto entendimentos físico de seus fenômenos associados, compondo um desafio técnico-educacional para discentes e docentes.

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) apresenta-se como uma importante ferramenta potencializadora de ensino-aprendizagem, na medida que insere o

conceito de experimentação numérica no processo de aprendizagem gerando uma maior compreensão dos conceitos associados ao comportamento dos fluidos [1].

2 Equações Governantes

Os problemas puramente hidrodinâmicos na área de dinâmica dos fluidos são governados de forma completa por equações diferenciais que modelam princípios conservativos [2]. A priori temos a conservação da massa para um fluido considerado incompressível em regime permanente de escoamento.

Por sua vez a conservação de momento linear pode ser escrita ao desprezar as forças de campo em uma forma mais geral.

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

Ao considerar o modelo constitutivo de um fluido newtoniano sem efeitos de compressibilidade modela-se o tensor viscoso como tal.

$$\tau_{ij} = \eta \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (2)$$

O uso do modelo constitutivo 2 na equação conservativa 1 dá origem a conhecida equação de Navier-Stokes.

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \eta \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (3)$$

Por fim é possível mostrar que existe um agrupamento adimensional com importância ímpar quando trata-se de hidrodinâmica, responsável por ponderar a magnitude das forças inerciais em detrimento das forças viscosas, denominado adimensional de Reynolds (Re). Segue a forma adimensionalizada da equação de Navier-Stokes.

$$u_j^* \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^*} = -\frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_i^* \partial x_j^*} \quad (4)$$

Nota-se através da equação 4 a importância do número de Reynolds no contexto da hidrodinâmica do escoamento, uma vez que o mesmo surge na forma adimensionalizada compondo produto com o termo difusivo ou viscoso do escoamento [3]. Entre outras palavras é possível mostrar a relevância dos termos viscosos com uma simples análise limítrofe quando $Re \rightarrow 0$ e $Re \rightarrow \infty$.

3 Modelagem Numérica

A aplicação do conceito de dinâmica dos fluidos computacional é implementada neste desenvolvimento através do *software* ANSYS devido a sua grande difusão no meio acadêmico e profissional. Tal pacote comercial utiliza o método dos volumes finitos (MVF) como ferramenta para solução numérica de escoamentos.

3.1 Problema Físico

O fenômeno físico a ser solucionado é um escoamento de Hagen-Poiseuille, que corresponde a um escoamento completamente desenvolvido através de um duto circular em regime laminar de fluxo [3]. A escolha de tal escoamento foi motivada pela relativa simplicidade de sua modelagem e conhecimento geral de sua existência pelos estudantes, facilitando desta forma uma posterior análise de ganhos educacionais.

Considere o escoamento através de um duto de diâmetro D e comprimento L com condição hidrodinâmica de velocidade em sua entrada e de pressão em sua saída.

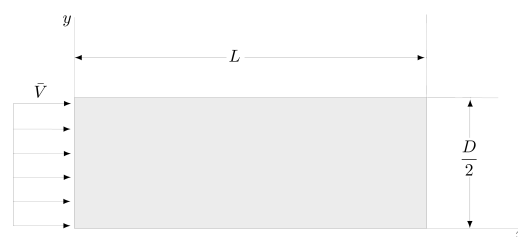


Figura 1: Geometria e condições de contorno do problema

Os parâmetros físicos adotados são demonstrados na tabela 1.

Fluido	Ar
Velocidade Inicial	1 m/s
Diâmetro	0,2 m
Viscosidade	0,002 Ns/m ²
Massa Específica	1 kg/m ³
Comprimento	8 m
Pressão de Saída	1 atm

Tabela 1: Dados utilizado na simulação

No âmbito da hidrodinâmica certos adimensionais merecem relevância diferenciada. O número de Reynolds, tem o importante papel de caracterizar o regime de fluxo no qual se encontra o escoamento, podendo este ser laminar ou turbulento. Para um duto cilíndrico modela-se:

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\eta} \quad (5)$$

Um segundo adimensional essencial é o fator de atrito, que tem por função principal contabilizar o gradiente de pressão de escoamentos internos em qualquer condição de regime de fluxo ou rugosidade de parede [4].

$$f = \frac{8\tau_w}{\rho \bar{V}^2} \quad (6)$$

A tensão de cisalhamento de parede pode ser facilmente modelada por um balanço de forças de pressão e cisalhantes na região desenvolvida do escoamento e é dada por:

$$\tau_w = -\frac{R}{2} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (7)$$

A solução da equação 3 com condições apropriadas de não-deslizamento na parede do duto e gradiente de velocidade nulo na linha de centro resultam em um perfil de velocidade parabólico.

$$u(r) = -\frac{R^2}{4\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (8)$$

Este perfil de velocidade tem seu formato constante ao logo do avanço do escoamento a partir de um comprimento de entrada definido empiricamente [5].

$$\frac{L_e}{D} \approx 0,05 Re \quad (9)$$

A modelagem analítica do problema de Hagen-Poiseuille é utilizada como diretriz para análise de convergência de malha.

3.2 Convergência de Malha

A fase de teste da malha deve preceder qualquer tipo de geração de resultado por ser tratar de procedimento padrão para certificar-se de que os resultados gerados por determinada simulação estejam corretos [7]. A validação é executada sempre que possível via parâmetros analíticos por questão de confiabilidade.

Malha	fRe	Erro (%)
5x100	61,41	4,05
10x100	63,23	1,20
20x100	63,71	0,45
40x100	63,83	0,27
80x100	63,88	0,18

Tabela 2: Convergência de malha da simulação

No caso do escoamento laminar em dutos na região desenvolvida, a malha utilizada é do tipo estruturada e o parâmetro mais adequado recai sobre o produto $f \cdot Re$, que representa um balanço de quantidade de movimento na região desenvolvida, ou mais simploriamente um balanço de forças [6]. Deste forma se o produto $f \cdot Re$ a região desenvolvida como um todo do escoamento está convergida.

3.3 Potencial Didático do DFC

As simulações computacionais fornecem a estudantes, pesquisadores e profissionais ferramentas potencializadoras no intuito do entendimento de fenômenos físicos de interesse, seja para investigação científica ou aplicações.

A abrangência da experimentação numérica comporta a manipulação de problemas físicos de ordens de complexidade diversa, se comportando bem

em casos mais simples ou mesmo em fenômenos mais exigentes do ponto de vista matemático-comportamental [8]. Entretanto, o potencial didático implícito no uso de recursos computacionais revela-se de forma mais clara na manipulação de um problema físico simples tal como é o escoamento laminar de um duto cilíndrico.

A interação do fluido com superfícies sólidas em qualquer escoamento interno é marcado pela presença de uma região próxima a superfície na efeitos viscosos são significantes, denominada região de camada limite. O entendimento do processo de desenvolvimento da camada limite em um tubo é fundamental para posterior estudo da região desenvolvida do escoamento. Entretanto a correta visualização deste processo nem sempre é tão trivial, dando ensejo ao uso de novas ferramentas potencializadoras de aprendizado, como é o caso do DFC.

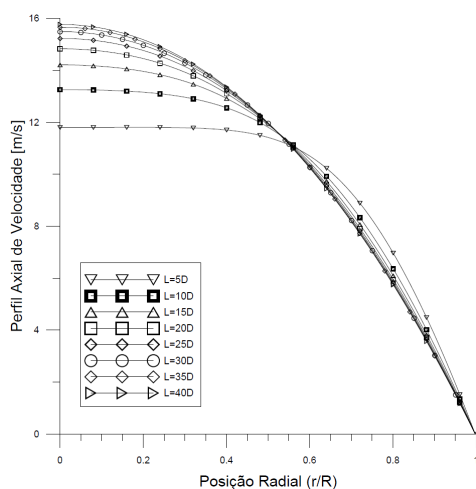


Figura 3: Desenvolvimento do perfil de velocidade axial

A figura 1 representa de forma clara a mudança no perfil de velocidade ao longo de várias posições axiais diferentes. A idéia central da camada-limite é elucidada ao comparar o perfil em $L = 5D$, que apresenta um formato achatado representativo de uma grande região de escoamento com gradiente nulo, portanto fora da camada-limite, com o último perfil de velocidade em $L = 40D$ cuja característica parabólica ilustra um formato na região desenvolvida invariante com a direção axial, no qual o escoamento apresenta efeitos viscosos

em toda sua extensão. Os resultados das simulações numéricas são extraídos com facilidade nos ambientes de DFC mostrando a versatilidade e o dinamismo presentes nesse conceito.

É possível também a confirmação de modelos analíticos e empíricos através do DFC, consolidando o entendimento de diversos comportamentos físicos por mais de uma ótica de análise. Um exemplo peculiar é do comprimento hidrodinâmico de entrada dado pela equação 9. O comprimento de entrada nessa expressão empírica é função, de forma geral, do número de Reynolds. Há diversas formas de analisar este parâmetro de desenvolvimento, tal como acompanhar a aceleração da linha de centro do escoamento, como ilustra a figura 4.

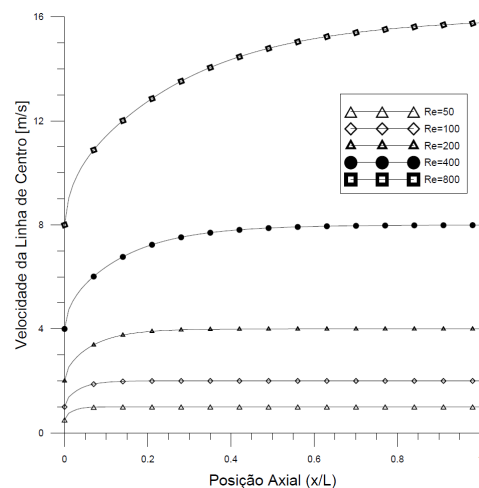


Figura 4: Velocidade da Linha de Centro em função da posição axial

A manutenção de uma mesma geometria a medida que o número de Reynolds é consecutivamente dobrado relevam um comportamento parecido ao da figura 4, onde o comprimento de entrada coincide com o ponto das curvas onde a velocidade de centro estabiliza-se próxima ao seu patamar máximo, equivalente ao dobro da velocidade média no sobre o eixo das ordenadas.

Se por um lado o comprimento de entrada foi determinado pela linha de centro, de forma análoga poderia ser estimado pelo fator de atrito ou mesmo pela queda de pressão ao longo da tubulação, processo este que seria extremamente tra-

balhoso numa coleta experimental, em detrimento a experimentação numérica que pode também ser rápida e precisa num problema de natureza tão simples. Tais recurso empíricos e computacionais não se portam em concorrência e sim em mutualismo, ou seja é importante retirar o melhor do potencial de cada um deles. Mais um dos importantes ganhos gerados pelo DFC caracteriza-se pela facilidade na execução de análises paramétricas. Após a convergência e geração de uma malha de qualidade é possível testar o comportamento de uma variável de interesse em relação a várias outras, configurando-se uma ferramenta interessante na exploração e entendimento dos pormenores do um fenômeno em estudo.

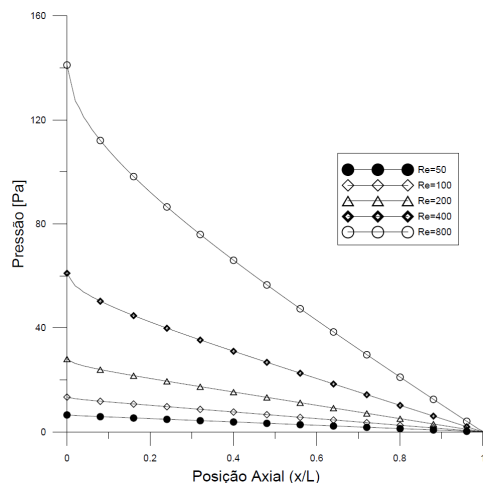


Figura 5: Queda de pressão ao longo da direção axial

O comportamento mostrado na figura 5 representa uma análise da queda de pressão a medida do avanço do escoamento pela tubulação em função do adimensional de Reynolds. Tal análise revela a queda de pressão não linear na região de entrada, e posterior queda de pressão com gradiente constante na região desenvolvida. Tal comportamento deve-se ao fato de atrito que estabiliza-se a um valor constante na região desenvolvida, o que seria facilmente observável como um gráfico de sensibilidade do mesmo ao longo da direção axial.

As vantagens e motivações aqui apresentadas ao uso do conceito DFC são extremamente contundentes em todas as vertentes de ensino, a saber, em nível de

graduação e pós-graduação. Graduandos em contato com ferramentas computacionais geram para si um novo horizonte de aprendizado, análise e visualização dinâmica de fenômenos físicos, ampliando um escopo antes restrito a modelagem matemática. Em linhas paralelas, pesquisadores, estudantes de mestrado e doutorado utilizam-se do DFC e seus recursos na investigação e solução de tópicos complexos tais como turbulência, combustão, comportamento reológicos complexos que nem sempre apresentam a disposição, soluções analíticas ou mesmo dados experimentais. Em tais situações a experimentação numérica figura como única opção para análise, o que mostra sua importância vital na ciência contemporânea.

4 Conclusão

O nível de domínio conceitual sobre um fenômeno físico de interesse está correlacionado com um alicerce tríplice: modelo teórico, experimentação e simulação computacional.

Tal composição de entendimento deve ser construída com coerência e sequenciamento lógico. A formação de uma base com a modelagem matemática teórica constitui o momento da aprendizagem no qual associa-se um fenômeno físico a um conjunto matemático que o descreva de forma verossímil. Uma posterior etapa empírica é desejável para em conjunto com a modelagem teórica, unir a física e a matemática numa aderência ideal, na qual os termos do modelo ganham significado e o entendimento em relação ao fenômeno se aprofunda, gerando-se capacidade de inferir acerca da sensibilidade de determinada variável em relação a outras.

No passado, a ausência de recursos computacionais fazia com que os testes de laboratório através de protótipos e modelos em escala reduzida dominassem o cenário tecnológico. Hoje, a simulação computacional oferece a oportunidade de

realizar projetos de engenharia e otimizá-los através de modelos numéricos eficientes e pouco custosos. Essa mesma ferramenta pode ser usada com o intuito de catalisar o processo de aprendizado, pela agilidade na reprodução fenomênica e no controle e alteração das múltiplas variáveis de estado, que estão presentes, sobretudo, na área de fenômenos de transporte. Portanto, as técnicas computacionais são imprescindíveis na seara educacional servindo como um versátil meio de investigação científica para docentes e discentes, permitindo uma dinamização do ensino-aprendizado de diversos fenômenos, uma vez que viabilizam praticidade na execução de múltiplos testes ou mesmo possibilitam a simulação de problemas cuja experimentação é inviável.

Referências

- [1] VERSTEEG, H. K; MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Pearson Education, 2007.
- [2] SLATTERY, J. C. Advanced Transport Phenomena. Cambridge University Press, 1999.
- [3] SCHLICHTING, H.; GERSTEN, K. Boundary Layer Theory. Springer Science, 2003.
- [4] CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações. Porto Alegre: AMGH Editora, 2015.
- [5] KAYS, W. M.; CRAWFORD M. E.; WEIGAND, B. Convective Heat Transfer. McGraw Hill, 1980.
- [6] SOARES, E. J. Transferência de calor em escoamento laminar de materiais viscoplásticos através de espaços anulares. 80f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 1999.
- [7] DE OLIVEIRA FORTUNA, Armando. Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações. São Paulo: Edusp, 2000.
- [8] CLÓVIS, R. Maliska. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. Rio de Janeiro: LTC, 2013.